

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA COMPARAÇÃO DE SISTEMAS DE AR
CONDICIONADO

por

Patrício Baggio

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2011

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA COMPARAÇÃO DE SISTEMAS DE AR
CONDICIONADO**

por

Patrício Baggio

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Comissão de Avaliação:

Prof. Paulo Smith Schneider

Prof. Sérgio Luiz Frey

Prof. Bardo E. Joseff Bodmann

Porto Alegre, 05 de Dezembro de 2011.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, por todo o apoio e incentivo essenciais para minha formação.

aos colegas e amigos pela ajuda durante esses anos.

ao orientador, Prof. Dr. Paulo Otto Beyer pelo tempo disponibilizado para a orientação deste trabalho.

Baggio, P. **Simulação computacional para comparação de sistemas de ar-condicionado**. 2011. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo fazer uma simulação computacional do comportamento energético do prédio do foro central de Porto Alegre que recentemente teve seu sistema de ar-condicionado substituído. O trabalho comparará o consumo de energia do edifício com sistema de ar condicionado antigo, que era constituído por grupos de água gelada, com o novo sistema instalado, formado por equipamentos individuais *split* do tipo VRF (*Fluxo de refrigerante variável*), identificando qual dos sistemas é mais eficiente energeticamente. Para este estudo será usado o *software EnergyPlus* versão 6.0, com o intuito de aproximar-se ao máximo da realidade, a simulação é feita para o período de um ano com base em dias de projeto ASHRAE usando o arquivo climático da cidade de Porto Alegre. Através de análises concluiu-se que para esta edificação, o consumo de energia elétrica do sistema VRF é 25% menor se comparado ao do sistema água gelada, assim como consumo total do prédio e a demanda que foram reduzidos em 10 e 13% respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: EnergyPlus, Eficiência Energética, VRF, Água Gelada.

Baggio, P. **Computer simulation for comparison of systems air-conditioned**. 2011. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

The main goal of this study is to make a computer simulation of the energy behavior of the Porto Alegre Central Forum Building which recently had its air conditioning system replaced. A comparison was made between the energy consumption of the building using the old air conditioning system composed by groups of cold water, with the newly installed system consisted of individual VRF (Variable Refrigerant Flow) 'split' type equipment, attempting to determine which one is the most efficient. In an effort to catch a most realistic approach, the simulation is done for a one year period based on ASHRAE design day weather file for the city of Porto Alegre, using the EnergyPlus v6.0 software to achieve this purpose. The results of the analysis indicated an electric energy consumption reduction of 25% compared with the old chilled water system, as well as the total consumption and demand of the building which was reduced by 10% and 13%, respectively.

KEYWORDS: EnergyPlus, Energy Efficiency, VRF, Chillers.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. FERRAMENTA COMPUTACIONAL.....	2
3.1 Google Sketchup.....	2
3.2 Open Studio	2
3.3 EnergyPlus.....	2
3.4 Arquivo climático	2
3.5 Dias de projeto	3
3.6 Variáveis de entrada.....	3
3.6.1 Coeficiente de performance (COP).....	3
3.7 Equações de balanço de energia da zona térmica	4
3.7.1 Balanço de energia na face externa da zona.....	4
3.7.2 Balanço de energia na face interna da zona.....	4
3.7.3 Balanço de energia nas janelas.....	4
3.8 Variáveis de saída.....	5
3.9 Sistema VRF	5
3.10 Sistema Água Gelada.....	5
3.11 Acoplamento do sistema de ar-condicionado ao EnergyPLUS.....	6
4. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	6
4.1 Cargas internas	7
4.2 Equipamentos	7
4.3 Pessoas	7
4.4 Iluminação.....	7
4.5 Infiltração.....	8
4.6 Utilização do prédio (<i>schedules</i>).....	8

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	8
5.1 Consumo elétrico do sistema Água Gelada.....	8
5.2. Consumo elétrico do sistema VRF	9
5.3. Comparação do consumo entre os sistemas	11
5.4 Demanda de energia	12
6. CONCLUSÃO.....	13
Referências Bibliográficas	14
Apêndice I	15
Apêndice II.....	16
Anexo I	17
Anexo II	17
Anexo III	18

1. INTRODUÇÃO

Quando ocorre a necessidade de substituir algum sistema ou equipamento que deixou de atender aos requisitos para os quais foi projetado, surgem diversos questionamentos a respeito da melhor forma de fazer. Cabe então ao projetista e aos interessados fazer um estudo detalhado de cada caso levando em consideração as necessidades que o novo sistema deverá atender, os custos de implantação, a viabilidade técnica e o consumo de energia.

O sistema de ar-condicionado como qualquer outro, possui um período de vida útil definido, que quando alcançado o torna obsoleto devendo então passar por uma reforma ou ser substituído. Em muitos casos o sistema encontra-se muito defasado e seus componentes sucateados tornando a reforma economicamente inviável, sendo necessário então substituir completamente o mesmo. Esta substituição poderá ser feita trocando-se apenas os equipamentos por outros novos mantendo a mesma configuração do sistema, ou selecionar entre as diversas opções existentes no mercado a que melhor atenda as necessidades do projeto.

O consumo excessivo de energia é uma das maiores preocupações da sociedade moderna, pois além de esgotar recursos naturais ocasionando desequilíbrios ambientais, onera consideravelmente as atividades econômicas, tornando-as em muitos casos inviáveis. Com isso busca-se a cada dia reduzir o consumo através do uso de equipamentos mais eficientes e que atendam as necessidades dos consumidores. O sistema de ar condicionado é responsável em muitos casos pela maior parte do consumo de energia em uma edificação por isso deve receber atenção especial quando projetado.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da substituição do sistema de ar-condicionado no consumo energético de uma edificação, comparando o consumo de energia para dois sistemas diferentes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Boeno, 2010, usando o programa de simulação computacional EnergyPlus, comparou o sistema de água gelada com o sistema (VRF) Fluxo de Refrigerante Variável, buscando obter a eficiência energética de cada um, aplicados a um prédio Histórico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Boeno concluiu que para a edificação estudada o sistema VRF mostrou-se mais eficiente que sistema de água gelada, sendo a diferença mais acentuada entre os meses de abril a novembro. Atribui-se este maior consumo do sistema de água gelada neste período ao funcionamento das bombas, ventiladores e ciclo de refrigeração, pois mesmo no período de inverno algumas zonas permanecem necessitando de refrigeração devido a incidência do sol em algumas fachadas. Assim o sistema opera de forma total mesmo para atender algumas zonas do prédio.

Stein, 2011, buscou através de estudos fazer uma melhoria na eficiência energética de um prédio em Porto Alegre, onde além de sugerir alterações arquitetônicas também propôs a substituição do sistema de ar-condicionado existente (Água Gelada) pelo sistema VRF.

Carotenuto, 2009, através de um estudo criterioso do desempenho energético de um prédio histórico de elevada inércia térmica localizado em Porto Alegre, fez simulações usando o *software* computacional EnergyPlus, dimensionou o sistema de ar-condicionado do tipo VRF pois julgou ser este o mais eficiente. Para declarar o sistema de ar-condicionado ao software utilizou dados fornecidos pelo fabricante dos equipamentos como potência de refrigeração, vazão de ar, potência dos ventiladores, coeficiente de performance (COP) de cada máquina. Carotenuto identificou que os principais consumidores de energia do prédio são os equipamentos (computadores, impressoras, etc.), seguido pela iluminação interna e por último o sistema de ar-condicionado.

3. FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Na primeira etapa do trabalho fez-se o modelo 3D do prédio usando o Google Sketchup versão 8.0 com o *plugin* Open Studio, após esta etapa passou-se a fazer a simulação computacional usando a ferramenta computacional *EnergyPlus* versão 6.0.

3.1 GOOGLE SKETCHUP

O *Google Sketchup* é um programa que permite criar modelos tridimensionais de edificações com certa praticidade se comparado com outros programas existentes, o *Sketchup* foi desenvolvido pela *At Last Software* e sua utilização é gratuita.

3.2 OPEN STUDIO

O Open Studio é um *plugin* que possibilita a utilização de ferramentas do Google Sketchup para a criação e edição de zonas e superfícies usadas pelo *EnergyPlus*. Foi desenvolvido pela *National Renewable Energy Laboratory*, do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), sua distribuição é gratuita através da página do DOE.

3.3 ENERGYPLUS

O *EnergyPlus* originou-se de dois outros programas: BLAST (*Building Loads Analysis and Sistem Thermodynamics*) e DOE (*Departamento of Energy*). Ambos foram desenvolvidos no início da década de 70 como ferramentas de simulação de carga térmica e de análise do consumo de energia elétrica. O *EnergyPlus* possibilita avaliar o comportamento termo energético de uma edificação, através de diversos parâmetros que influenciam na dinâmica térmica, como composição de paredes, vidros, pisos, ocupação de ambientes, insolação entre outros, além de permitir a simulação de diferentes sistemas de ar condicionado, informando o consumo de energia elétrica mensal e anual da edificação e demonstrando o consumo individual de cada sistema envolvido, tal como iluminação, ar condicionado e outros equipamentos.

O programa é gratuito podendo ser obtido através da página do DOE, e esta no momento na versão 6.0.

3.4 ARQUIVO CLIMÁTICO

O arquivo climático local é gerado através de medições climáticas de temperatura, radiação solar, umidade, velocidade e direção do vento, realizadas em estações meteorológicas e aeroportos durante um período superior a dez anos.

A montagem estatística dos dados é realizada de duas maneiras: TMY (*Test Metereological Year*) e TRY (*Test Reference Year*). Na formatação do arquivo TMY, são selecionados os meses mais expressivos que ocorrem no período medido, resultando em um ano formado por meses de anos diferentes, ou seja, o ano composto não existiu. Já no arquivo TRY é selecionado o ano mais representativo entre todos os anos medidos.

O arquivo climático da cidade de Porto Alegre usado no presente trabalho foi obtido através da página do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - LABEEE, 2011, da Universidade Federal de Santa Catarina, este arquivo está em formato EPW (*EnergyPlus Weater*) próprio para *EnergyPlus*.

A Figura 3.1 mostra a evolução temperatura de bulbo seco da cidade de Porto Alegre durante o ano, sendo estes os dados climáticos usados pelo programa.

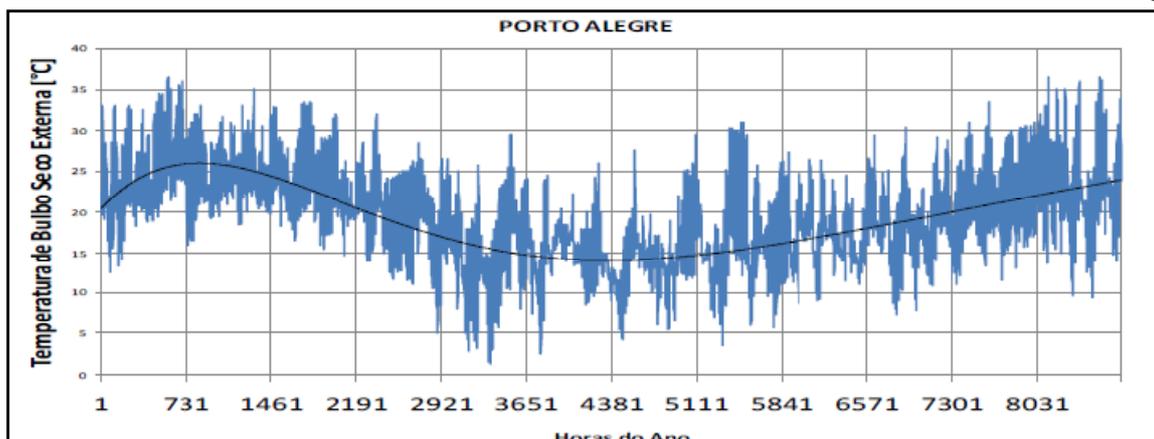


Figura 3.1 - Evolução anual da temperatura de bulbo seco da cidade de Porto Alegre.

3.5 DIAS DE PROJETO

Os dias de projeto de verão são obtidos nas condições de umidade e temperaturas, baseados em ocorrências cumulativas anuais de 0,4, 1,0, e 2% das 8760 horas do ano, ABNT (2008), ou seja, abaixo da frequência de ocorrência escolhida para o dia de projeto, o sistema de ar-condicionado pode não manter a temperatura nos padrões para o qual foi dimensionado que para o verão é de 24,5°C.

Para os dias de projeto de inverno, as condições de umidade e temperaturas são obtidas baseadas em ocorrências cumulativas anuais de 99 e 99,6% das 8760 horas, acima destas o sistema poderá não atender a temperatura média de 20°C que foi usada neste trabalho.

3.6 VARIÁVEIS DE ENTRADA

O início do trabalho se dá através da modelagem 3D do prédio usando o programa Google Sketchup em conjunto com o *plugin* Open Studio obtém-se o modelo arquitetônico do prédio, com este modelo pronto, passa-se a declarar as superfícies que o compõe, como paredes, janelas, pisos, forros. Para a simulação divide-se a edificação em zonas térmicas, estas zonas compreendem ambientes que apresentam um mesmo perfil de carga térmica, segundo ABNT 2008.

Após serem declaradas todas as superfícies constituintes do edifício, informa-se ao *EnergyPlus* as características de cada superfície, como espessura, densidade, condutividade térmica, refletividade, tonalidade de cores, informam-se ainda características de ocupação do prédio, tais como quantidade de pessoas, iluminação, equipamentos, infiltrações, período de utilização de equipamentos e potências dos sistemas de ar-condicionado.

3.6.1 COEFICIENTE DE PERFORMANCE (COP)

O coeficiente de performance de um equipamento térmico é definido como sendo a relação entre o efeito útil e a energia gasta, [Beyer, 2008]. Através de informações obtidas em catálogos de fabricantes calculou-se o COP de cada equipamento sendo assim:

$$COP = \frac{\text{Efeito Útil}}{\text{Energia Gasta}} \quad (3.1)$$

onde *Efeito Útil* é a capacidade de resfriamento ou aquecimento, *Energia Gasta* é o consumo de energia elétrica.

Para os resfriadores de líquido (*chillers*) foi usado COP igual a 4, [Hitachi 2003], para boiler de aquecimento COP 1, para o sistema VRF em refrigeração 3.1 e aquecimento 3.7, [Midea 2011].

3.7 EQUAÇÕES DE BALANÇO DE ENERGIA DA ZONA TÉRMICA

O balanço de energia da zona térmica em regime transiente é feito através da resolução da seguinte equação diferencial ordinária:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{Ncl} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{Ns} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{Nz} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} c_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{sys} c_p (T_{sup} - T_z) \quad (3.2)$$

onde $C_z \frac{dT_z}{dt}$ é a taxa de energia acumulada na zona, $\sum_{i=1}^{Ncl} \dot{Q}_i$ é o somatório das cargas internas do ambiente, $\sum_{i=1}^{Ns} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ é a taxa de calor devido convecção através das superfícies, $\sum_{i=1}^{Nz} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z)$ é o somatório das taxas de calor provenientes de outras zonas, $\dot{m}_{inf} c_p (T_{\infty} - T_z)$ é o somatório das taxas de calor provenientes da infiltrações do ar externo, $\dot{m}_{sys} c_p (T_{sup} - T_z)$ é a taxa de calor fornecida pelo ar-condicionado. Todos em (W).

3.7.1 BALANÇO DE ENERGIA NA FACE EXTERNA DA ZONA

O balanço de energia na superfície difusa externa da zona térmica é dada por:

$$q''_{\alpha sol} + q''_{lwr} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (3.3)$$

onde $q''_{\alpha sol}$ é o fluxo de radiação solar direta e difusa absorvida, q''_{lwr} é o fluxo de energia radiante trocado com o meio, q''_{conv} é o fluxo de calor trocado por convecção entre a superfície e o ar externo, q''_{ko} é o fluxo de calor trocado por condução na face externa da zona, todos em W/m².

3.7.2 BALANÇO DE ENERGIA NA FACE INTERNA DA ZONA

O balanço de energia na superfície difusa interna da zona térmica é dado pela seguinte equação:

$$q''_{lwx} + q''_{sw} + q''_{lws} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (3.4)$$

onde q''_{lwx} é o fluxo de energia trocado entre as superfícies, q''_{sw} é o fluxo de energia por radiação térmica da iluminação para as superfícies, q''_{lws} é o fluxo de energia por radiação térmica dos equipamentos da zona, q''_{ki} é o fluxo de calor por condução na face interna da parede, q''_{sol} é o fluxo de energia por radiação solar transmitida, absorvida pela superfície, q''_{conv} é o fluxo de calor por convecção do ar da zona. Todos em W/m².

3.7.3 BALANÇO DE ENERGIA NAS JANELAS

Para fazer o balanço de energia nas superfícies translúcidas, usa-se a seguinte equação:

$$Q = U * Apf (T_{out} - T_{in}) + (SHGC) * Apf * Et \quad (3.5)$$

onde Q é o fluxo de energia em (W), U é o coeficiente de transferência de calor em (W/m^2), A_{pf} é a área da superfície translúcida em (m^2), T_{out} é a temperatura externa do ar em ($^{\circ}C$), T_{in} é a temperatura interna do ar em ($^{\circ}C$), ($SHGC$) é o coeficiente de ganho de calor solar (ADM), E_t é irradiação total incidente em W/m^2 .

3.8 VARIÁVEIS DE SAÍDA

O *EnergyPlus* pode gerar diversos tipos de arquivos e variáveis de saída. Esses arquivos contêm as informações obtidas através das simulações realizadas com o modelo descrito. Porém cabe ao usuário escolher a série de variáveis e relatórios que serão gerados pelo programa. Esta seleção poder variar de simulação para simulação, fazendo com que o usuário tenha flexibilidade para escolher os dados necessários para sua análise.

Para este trabalho, solicitaram-se as variáveis necessárias para fazer a comparação entre os dois sistemas. Tanto para VRF e Água Gelada, os dados escolhidos foram: potência de refrigeração, vazão de ar, calor sensível, temperatura e potência de aquecimento, horário de pico de demanda de energia. Com essa seleção o programa gerou uma planilha com o valor individual de cada zona.

Além dos dados fornecidos para seleção de equipamentos o programa também fornece relatórios de consumo energético. Nas simulações feitas solicitaram-se os seguintes relatórios: consumo elétrico do ar-condicionado, o qual envolve refrigeração, aquecimento, potência dos ventiladores, consumo elétrico dos equipamentos e iluminação interna. Esses dados foram selecionados para ambos os sistemas. Para o sistema de Água Gelada foi fornecido também o consumo elétrico das bombas. Todos os dados gerados pelo programa foram apresentados com consumos mensais de energia.

3.9 SISTEMA VRF

O sistema de ar condicionado VRF surgiu no ano de 1982, desenvolvido pela fabricante japonesa de equipamentos Daikin. Desde então, vem ganhando espaço no mercado de equipamentos de ar-condicionado mostrando-se muito versátil e flexível, pois este sistema pode ser implantado nos mais variados tipos de edificações.

O VRF é classificado como um sistema central em que o conjunto de unidades de tratamento de ar de expansão direta, são geralmente instaladas dentro do ambiente a que servem (designadas unidades internas), cada uma é operada e controlada independentemente das demais através de um sistema de automação incorporado, cada unidade interna recebe uma quantidade de fluido refrigerante líquido em vazão variável (VRF) de uma unidade condensadora central, instalada externamente (designada unidade externa), que possui pelo menos um dos compressores que varia sua frequência de rotação. Este sistema conta ainda com a função de aquecimento, invertendo o ciclo de funcionamento (Ciclo Reverso) (ABNT, 2008). O anexo II mostra o diagrama esquemático do sistema.

O sistema VRF é comparado ao *Split* convencional, pois ambos possuem expansão direta e contam com unidade condensadora e evaporadora. Porém são sistemas que possuem limitações bem diferentes. Enquanto o VRF pode possuir várias unidades evaporadoras conectadas a uma condensadora, o *Split* trabalha apenas na relação 1 para 1, ou seja uma condensadora para uma evaporadora.

3.10 SISTEMA ÁGUA GELADA

O sistema de Água gelada é considerado um sistema de ar-condicionado central, composto por unidades de tratamento de ar de expansão indireta denominadas *fan coils*, estes necessitam ser abrigados em salas de máquinas apropriadas para seu funcionamento, os *fan coils* ligam-se aos ambientes a serem condicionados através de dutos construídos com chapas de aço galvanizado e a distribuição do ar no ambiente se dá através de difusores. As unidades de tratamento de ar recebem água gelada proveniente de uma central frigorígena composta por

um ou mais grupos resfriadores (*Chillers*) de água através de bombas que operam em circuito fechado. No anexo I tem-se o diagrama esquemático do sistema.

3.11 ACOPLAMENTO DO SISTEMA DE AR-CONDICIONADO AO ENERGYPLUS

O programa não possui um módulo que represente o sistema de ar condicionado do tipo VRF, pois as equações atuais contidas no *EnergyPlus* não permitem que o sistema opere em regime parcial de potência de refrigeração e aquecimento com vazão de fluido refrigerante variável.

Usando como referência Carotenuto (2009), utiliza-se do módulo do *EnergyPlus* com sistema de ar-condicionado com ciclo reverso e serpentina de expansão direta (*Unitary air-to-air heat pump system with DX expansion*), corrigindo assim as correlações de desempenho das unidades condensadoras para um regime de vazão de refrigerante constante e em regime de carga a 100% da potência, condição normatizada pelo fabricante para adaptar ao sistema VRF.

Para a Água Gelada o *EnergyPlus* possui módulos onde se pode acoplar o sistema de ar-condicionado ao programa normalmente, sem a necessidade de tomar como referência outro modelo. Porém não se tem a possibilidade de utilizar o sistema em modo “Ciclo Reverso”, sendo assim é necessária a utilização de um sistema de aquecimento separado, usou-se então um boiler com aquecimento elétrico.

4. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

O prédio utilizado para este estudo localiza-se na cidade de Porto Alegre, e pertence ao Tribunal de Justiça do Estado do Rio Grande do Sul denominado como Foro Central de Porto Alegre. O prédio é composto de 10 pavimentos, sendo que o pavimento térreo é usado como estacionamento de veículos, por isso não entrara neste estudo já que não é condicionado. Para realizar o presente estudo os pavimentos foram divididos em três categorias: Primeiro pavimento, sete pavimentos típicos e cobertura, cada um desses pavimentos foi dividido em 26 zonas térmicas diferentes conforme Figura 4.1, totalizando 236 zonas, sendo que deste total 108 são climatizadas, tendo uma área de 21706 m², as outras representam escadas de incêndio, sanitários e elevadores.

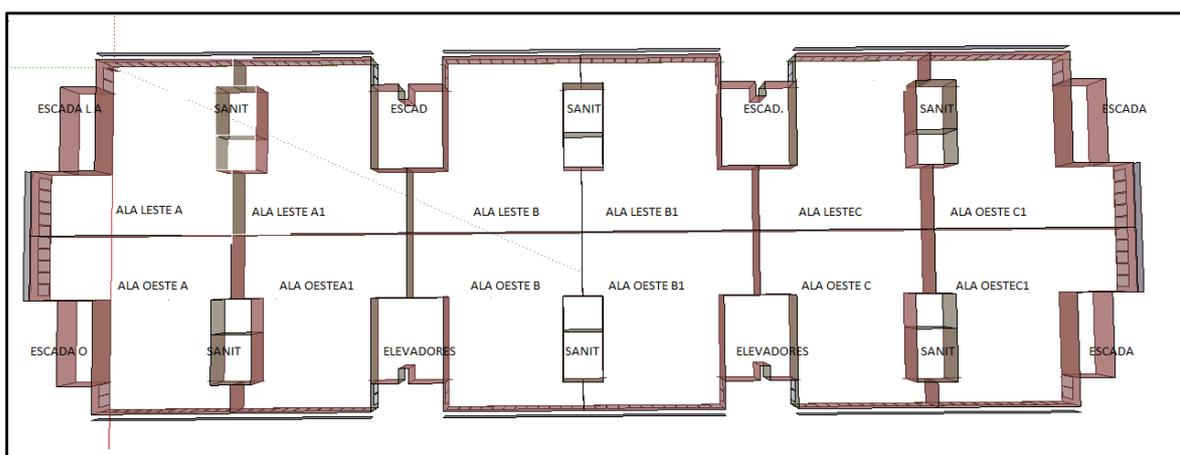


Figura 4.1 – Divisão do pavimento em Zonas Térmicas.

No lado oeste do prédio em estudo existe outro edifício de menor porte que foi representado no modelo, pois em determinados horários causa sombreamento em algumas zonas do prédio em estudo. A Figura 4.2 mostra o modelo feito no *GoogleSketchup* e uma foto do prédio.

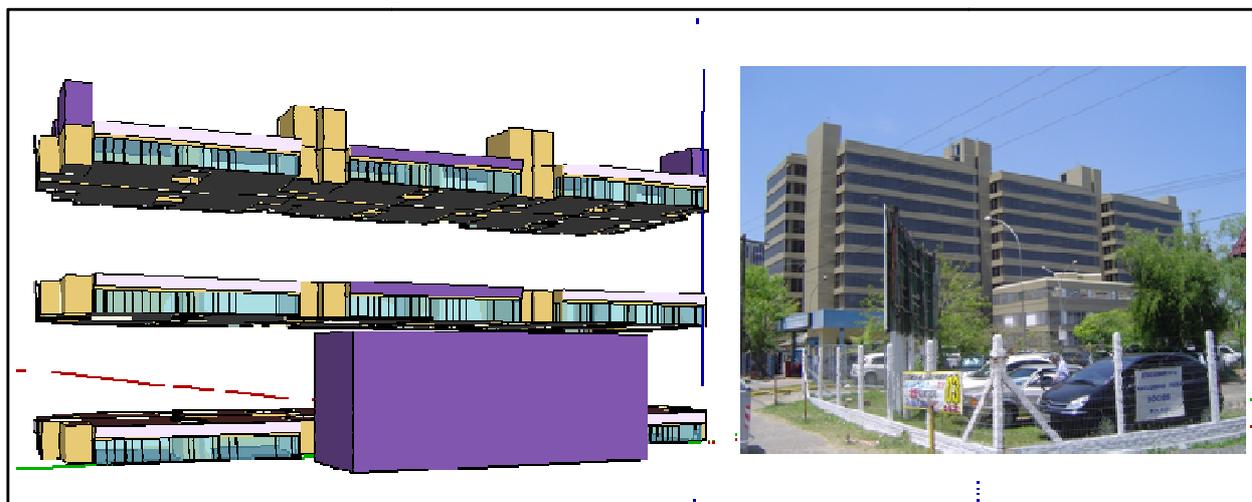


Figura 4.1 - Modelo feito no *GoogleSketchup* e foto do prédio.

4.1 CARGAS INTERNAS

As cargas internas correspondem a uma grande parcela do calor liberado ao ambiente. Essas cargas correspondem ao calor liberado por pessoas, equipamentos elétricos e sistema de iluminação.

4.2 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos são responsáveis por grande parte da carga térmica de um ambiente. Para as diversas zonas da edificação citam-se equipamentos como: computadores, impressoras, televisores, cafeteiras, refrigeradores. Para a carga dos equipamentos seguiram-se as recomendações propostas pela ASHRAE (2008).

4.3 PESSOAS

Para a determinação do nível de ocupação dos ambientes do prédio utilizaram-se informações disponibilizadas pelo Departamento de Engenharia e Arquitetura do Tribunal de Justiça (DEAM). Através dessas informações, chegou-se a uma taxa de ocupação para cada pavimento assim distribuída:

- Pavimento térreo = 4,5 m²/Pessoa
- Pavimento tipo = 6,7 m²/Pessoa
- Cobertura = 4,5 m²/Pessoa

Foi considerada uma taxa de renovação de ar para os ambientes de 7,5 L/s para cada ocupante, conforme ANVISA (2008).

4.4. ILUMINAÇÃO

Para obter dados referentes à dissipação térmica do sistema de iluminação, foi feito um levantamento no local, identificando a potência elétrica e a quantidade de luminárias existentes, chegando-se a uma taxa de dissipação térmica de 17 W/m².

4.5 INFILTRAÇÃO

Foi considerado que nas zonas simuladas com ar-condicionado não há infiltração, pois se admitiu pressão positiva nos ambientes quando a máquina de ar-condicionado estiver funcionando.

4.6 UTILIZAÇÃO DO PRÉDIO (*SCHEDULES*)

Nessa etapa são declarados ao sistema itens como dias e horários de ocupação do prédio, entrada e saída de pessoas, período de uso da iluminação, equipamentos e horários de funcionamento do ar-condicionado. Esses *schedules* são representados no programa de forma percentual, onde o valor um representa a máxima utilização ou ocupação e zero corresponde ao valor mínimo. Essa descrição é feita para todos os dias da semana abrangendo 24h, podendo-se ainda estabelecer exceções para os finais de semana e feriados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após serem feitas simulações para os dois sistemas, obtém-se resultados referentes a cada um em separado, como consumo elétrico mensal e anual de cada componente do prédio, apontando o mês e hora de maior consumo, carga térmica de cada zona, período em horas que o sistema de ar-condicionado não atende ao intervalo de temperatura para o qual o termostato foi programado.

5.1 CONSUMO ELÉTRICO DO SISTEMA ÁGUA GELADA

A evolução do consumo elétrico mensal do prédio em kW.h se dá pelo somatório do consumo de cada equipamentos existente, conforme gráfico da Figura 5.1. Para a obtenção do consumo de energia do sistema de ar-condicionado somam-se os gastos de todos os equipamentos que compõe o sistema, tais como ventiladores, bombas, refrigeração (compressores), aquecimento e torres de condensação.

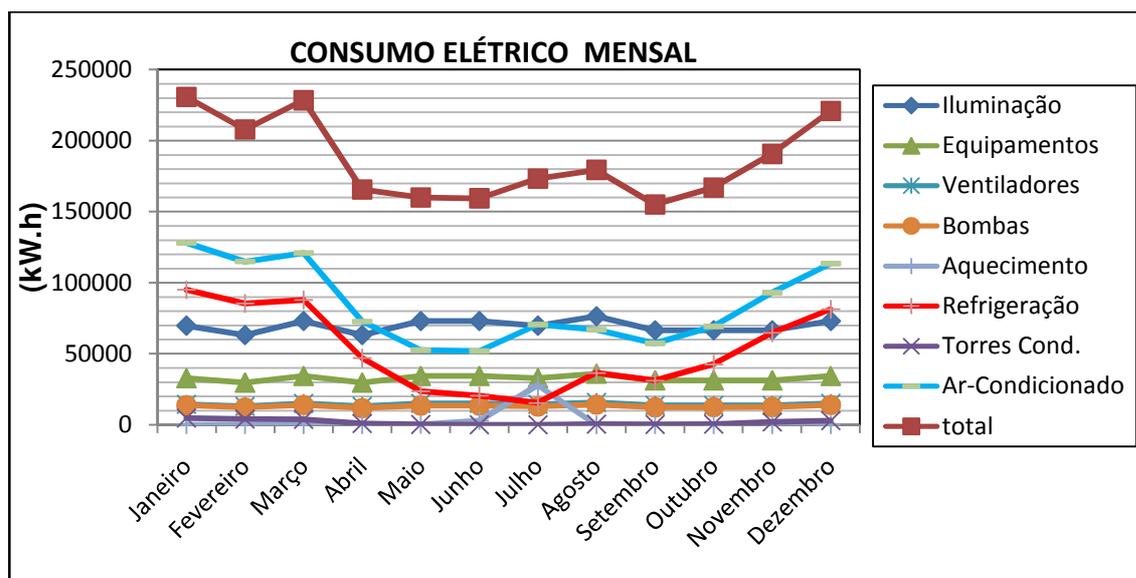


Figura 5.1 – Evolução do consumo elétrico mensal, sistema Água Gelada.

Através do gráfico da figura 5.1, percebe-se que a participação do ar-condicionado no consumo se dá principalmente nos meses de verão que vão de dezembro a março, o maior consumo elétrico é de 128148 kW.h e se dá no mês de janeiro, a refrigeração (compressores) gasta 95123 kW.h sendo responsável pela maior parte do consumo, seguida pelos ventiladores com 14426 kW.h, bombas com 13834 kW.h e torres de condensação com 4763 kW.h. Nota-se um decréscimo no consumo do ar condicionado nos meses de maio e junho, voltando a aumentar no mês de julho chegando a 70696 kW.h, que é o maior consumo do inverno, isto se dá devido a necessidade de aquecimento dos ambientes.

Percebe-se que o consumo dos equipamentos, iluminação, permanece constante durante todos os meses, já as bombas e ventiladores variam sensivelmente ficando em torno de 13600 e 14400 kW.h.

O gráfico da Figura 5.2 mostra a participação em porcentagem de cada componente no consumo total anual do prédio que foi de 2207379.97 KW.h, verificou-se que a iluminação interna tem a maior participação, seguida da refrigeração, equipamentos internos, ventiladores, bombas e torres de condensação.

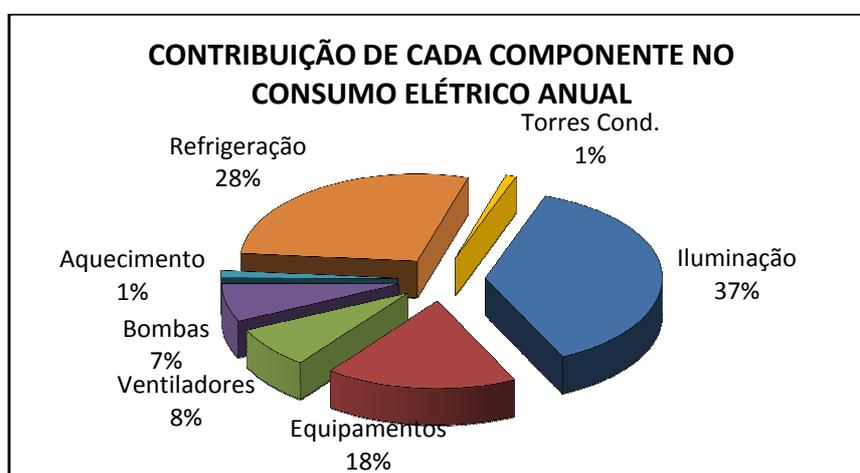


Figura 5.2 – Participação de cada componente no consumo total anual, sistema Água Gelada.

5.2. CONSUMO ELÉTRICO DO SISTEMA VRF

Semelhante ao sistema de Água Gelada, para obter a evolução do consumo mensal durante o ano deve-se somar os gastos de energia de cada equipamento que compõem o sistema, neste caso soma-se o os gastos da refrigeração, ventiladores e aquecimento. Como a condensação é a ar não existem bombas nem torres. No gráfico da Figura 5.3 tem-se a evolução do consumo de energia elétrica no decorrer do ano.

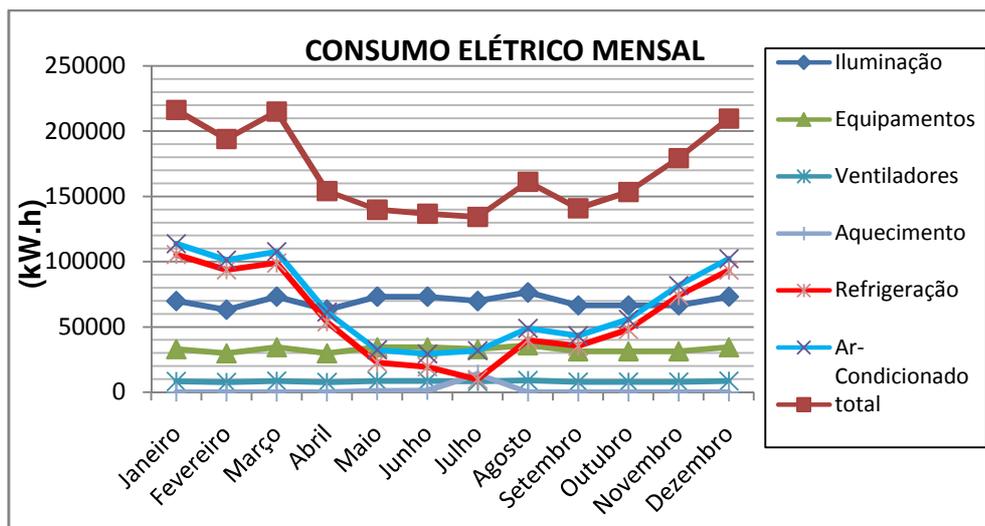


Figura 5.3 – Evolução do consumo elétrico mensal, sistema VRF.

Conforme o gráfico da figura 5.3 percebe-se uma semelhança com o sistema de água gelada, pois para os dois o maior consumo se dá durante os meses de verão, mais especificamente no mês de janeiro onde chega a 113603 kW.h, sendo a refrigeração responsável por 105420 kW.h e os ventiladores por 8182 kW.h. No inverno nota-se que o consumo é maior no mês de agosto 39907 kW.h, pois em determinadas zonas térmicas tem-se a necessidade de refrigeração.

O gráfico da Figura 5.4 tem por finalidade mostrar a participação que cada componente tem no consumo total anual do prédio que chegou a 2008392 kW.h/ano, tendo como maior consumidor o sistema de iluminação interno, seguido da refrigeração, equipamentos internos, ventiladores e aquecimento.

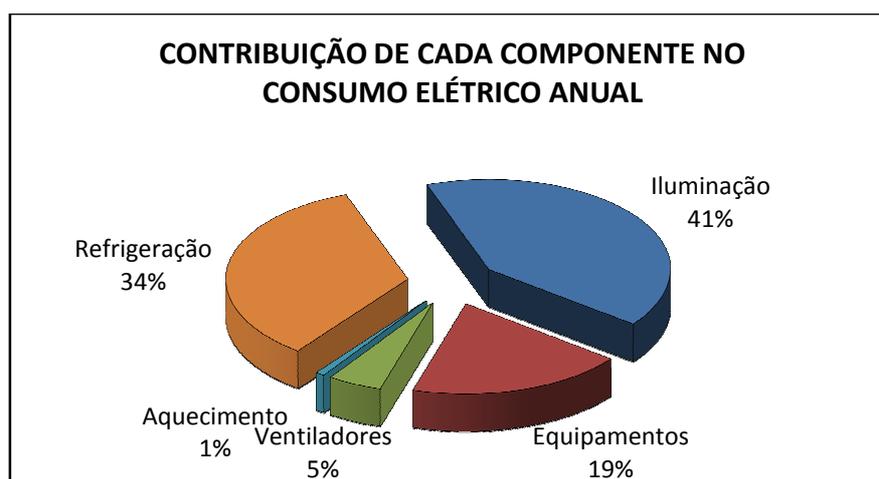


Figura 5.4 – Participação de cada componente no consumo total anual, sistema VRF.

Se comparar a redução total do consumo da edificação, obtém-se com a substituição do sistema uma redução de 10% no consumo de energia, passando de 2207379 para 2008392 kW.h/ano.

5.3. COMPARAÇÃO DO CONSUMO ENTRE OS SISTEMAS

No gráfico da Figura 5.5 comparou-se a evolução do consumo mensal de cada sistema

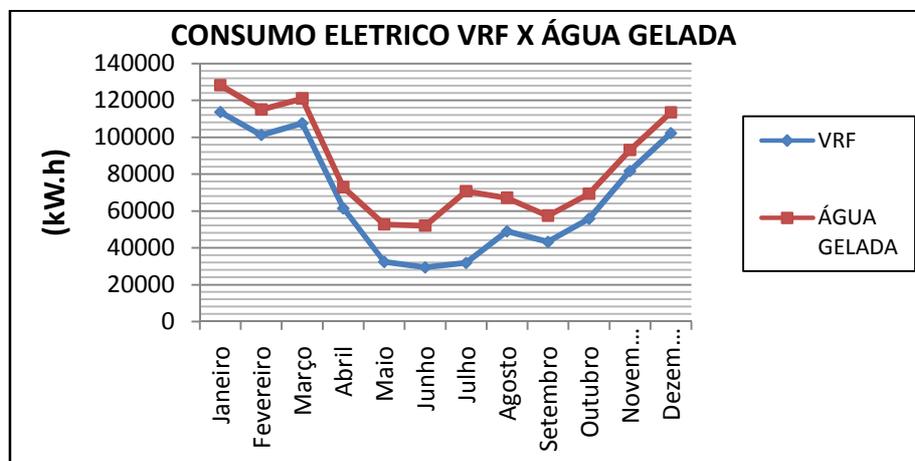


Figura 5.5 – Comparação do consumo elétrico, sistema VRF x Água Gelada.

Segundo o gráfico da Figura 5.5, percebe-se que o sistema com Água Gelada consome mais energia durante todo o período e que entre os meses de Abril a Setembro esta diferença fica mais visível. A explicação para esta maior diferença é que mesmo no período de inverno algumas zonas térmicas precisam de refrigeração por localizarem-se em fachadas sujeitas a uma maior insolação, exigindo assim que o sistema de ar-condicionado opere próximo da sua capacidade máxima, mesmo para atender apenas alguns ambientes.

O consumo anual do sistema VRF foi de 808464 kWh, já para o Água Gelada subiu para 1012435 kWh, tendo um acréscimo de 25%.

O gráfico da Figura 6.6 demonstra a variação do gasto mensal da edificação com os dois sistemas instalados. O valor da taxa cobrada foi obtido na página da Companhia Rio Grandense de Energia Elétrica (CEEE, 2011), que para clientes do poder público é de 0,208200 R\$/kWh.

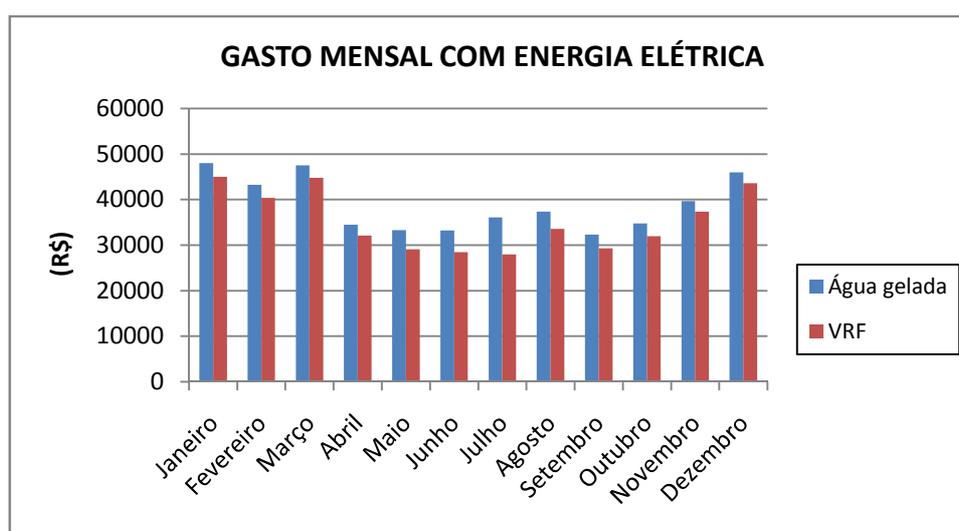


Figura 5.6 – Gasto mensal com energia elétrica.

5.4 DEMANDA DE ENERGIA

Através da simulação realizada pode-se obter a demanda de energia do prédio (W), identificando o dia do mês, em que ocorre o pico de demanda. O gráfico da Figura 5.7 mostra a demanda de energia do edifício com o sistema de Água gelada.

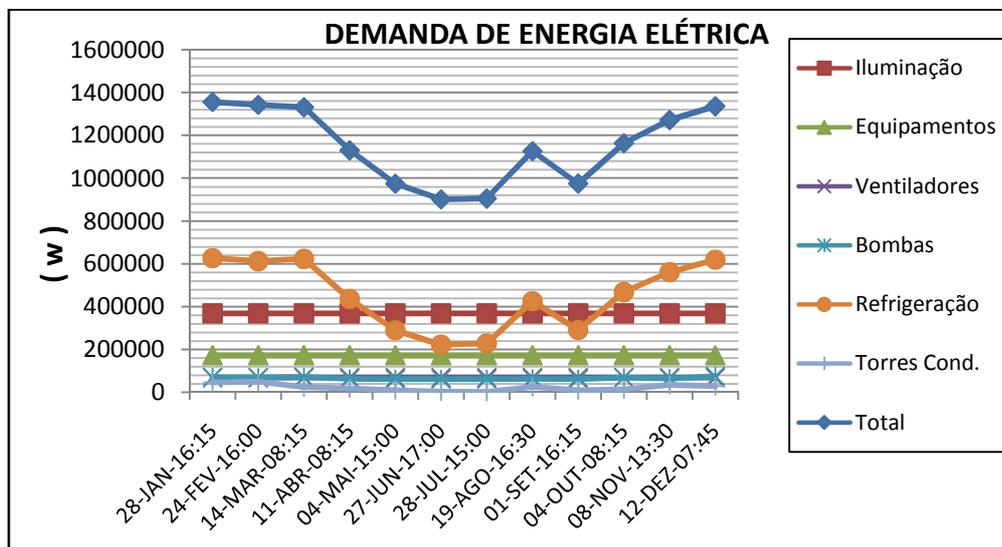


Figura 5.7 – Demanda de energia elétrica do edifício, com sistema de Água Gelada

O gráfico da Figura 5.7 mostra que a maior demanda de energia ocorre no mês de janeiro, chegando a 1356121 W no dia 28 às 16h45min, neste horário a refrigeração é a responsável pela maior demanda 627262 W, seguido pela demanda da iluminação e dos equipamentos que permanece constante durante todo o ano em torno de 369017 e 173655 W, e por fim das bombas e torres de condensação com 70667 e 46823 W com menores variações durante o ano.

O gráfico da Figura 5.8 mostra a evolução da demanda de energia para o prédio com sistema VRF.

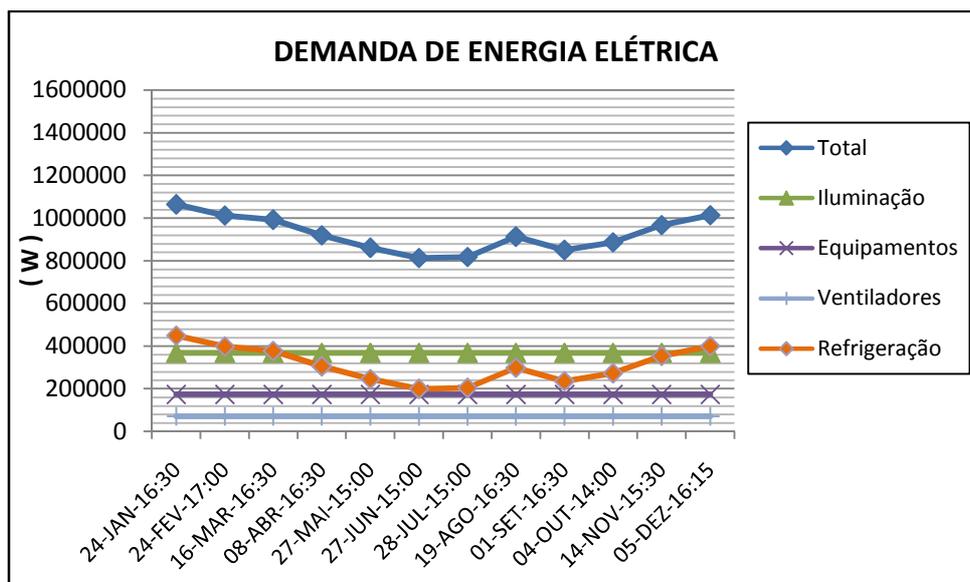


Figura 5.8 – Demanda de energia elétrica do edifício, com sistema VRF.

O gráfico da Figura 5.8 mostra que, semelhante ao sistema água gelada a demanda máxima de energia ocorre no mês de janeiro chegando a 1191661 W, porém ocorre no dia 24 às 16h30min e a mínima 813318 W ocorre no dia 28 de julho às 15 horas. A refrigeração demanda 449826 W, seguida pela iluminação, equipamentos e ventiladores com 369017, 173665 e 71480W respectivamente.

Analisando os resultados, percebe-se que o prédio com sistema VRF instalado possui um pico de demanda de energia elétrica 13% menor se comparado com o Água Gelada, tendo também uma curva de demanda mais homogênea, sem tantos picos, beneficiando com isso o sistema de distribuição elétrica. Vale apenas ressaltar que o prédio é utilizado das 8 até as 18 horas, ficando fora do horário de pico de energia, que é das 18 as 21 horas, conforme CEEE (2011).

6. CONCLUSÃO

Este trabalho utilizou a ferramenta computacional *EnergyPlus* para fazer a comparação entre dois sistemas de ar-condicionado existentes no mercado, quantificando o consumo de cada um deles para uma mesma edificação. Edificação esta que passou por uma reforma para substituição do sistema de ar-condicionado Água Gelada pelo sistema VRF.

Os resultados mostraram que para o caso estudado o novo sistema mostrou-se mais eficiente energeticamente que antigo, tendo um consumo de energia elétrica 25% menor que o anterior. Esta diferença fica mais visível entre os meses de março a setembro, a explicação é que durante este período a carga térmica se afasta da nominal, com isso o sistema VRF tende a ter um desempenho superior ao Água Gelada, já que consegue operar em carga parcial para atender só os ambientes que necessitam de refrigeração. Também contribuem para o maior consumo do sistema água gelada as bombas, ventiladores e torres de condensação. O consumo total de energia elétrica da edificação sofreu uma redução de 10% e a demanda teve uma redução de 13% com a instalação do novo sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR 16401 “**Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários**”. Rio de Janeiro, 2008.

ASHRAE, American Society of Heating, “**Refrigeration and Air-Conditioning Engineers**”, Inc.,ASHRAE Fundamentals HandBook, SI Edition, Atlanta, USA, 2009.

BOENO, W. S.; “**Comparação entre Dois Sistemas de Ar-Condicionado para um Prédio Histórico**”. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

BEYER, P. O.; “ **Apostila de Aquecimento Ambiental**”, Departamento de Engenharia Mecânica (DMEC), UFRGS, 2009.

CAROTENUTO, A. R.; “**Análise do desempenho termoenergético de um prédio histórico de elevada inércia térmica**”. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – UFRGS, Porto Alegre, 2009.

CEEE, Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul. “**Tabela de tarifas convencional 2011**”. <http://www.ceee.com.br>. Acessado em 10 de novembro de 2011.

Energyplus, “**EnergyPlus Input and Output Reference – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output**”, Version 6.0, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA.

Hitachi, “**Catálogo técnico, chiller condensação a água**”, emissão março 2002, revisão 00.

Labeee, Laboratório de eficiência energética em edificações, “**Arquivos climáticos**”, <http://www.labeee.ufsc.br>, acessado em 12/08/2011.

Midea, “**Catálogo técnico VRF inverter**”, <http://www.mideadobrasil.com.br>, acessado em 02/10/2011

APÊNDICE I

Período em horas, que o sistema de ar-condicionado não atende a temperatura especificada para o ambiente ocupado, durante o período de um ano.

ZONA	Água Gelada	VRF
TERREO ALA LESTE A	14.5	17
TERREO ALA LESTE A1	14.25	16.5
TERREO ALA LESTE B	14.5	17.25
TERREO ALA LESTE B1	14.25	16.5
TERREO ALA LESTE C	15	17.75
TERREO ALA OESTE A	9.75	12.5
TERREO ALA OESTE A1	7.25	10
TERREO ALA OESTE B1	0	0.25
TERREO ALA OESTE B	0	0
TERREO ALA OESTE C	6	7.75
TERREO ALA OESTE C1	9.5	12
TERREO ALA LESTE C1	14.5	16.5
TIPO ALA OESTE B1	11.25	14.5
TIPO ALA OESTE B	13.75	15.25
TIPO ALA OESTE C1	10.5	13.5
TIPO ALA OESTE C	11	14.75
TIPO ALA LESTE C	17.25	18.75
TIPO ALA LESTE B1	16.5	18.25
TIPO ALA OESTE A1	11.25	14.75
TIPO ALA OESTE A	11.5	13.75
TIPO ALA LESTE B	17	19
TIPO ALA LESTE C1	16.25	17
TIPO ALA LESTE A	16	19
TIPO ALA LESTE A1	17.25	19
COBERTURA ALA LESTE B	17.5	17.75
COBERTURA ALA LESTE A	16.25	17
COBERTURA ALA LESTE C1	16.25	17.5
COBERTURA ALA OESTE A	9.25	12.75
COBERTURA ALA OESTE A1	10.5	12.75
COBERTURA ALA LESTE C	17.25	18
COBERTURA ALA OESTE C1	9.25	12
COBERTURA ALA OESTE B	11.25	14.25
COBERTURA ALA OESTE B1	9.75	12.5
COBERTURA ALA LESTE A1	17	17.75
COBERTURA ALA LESTE B1	17	17.5
TOTAL	22.75	25

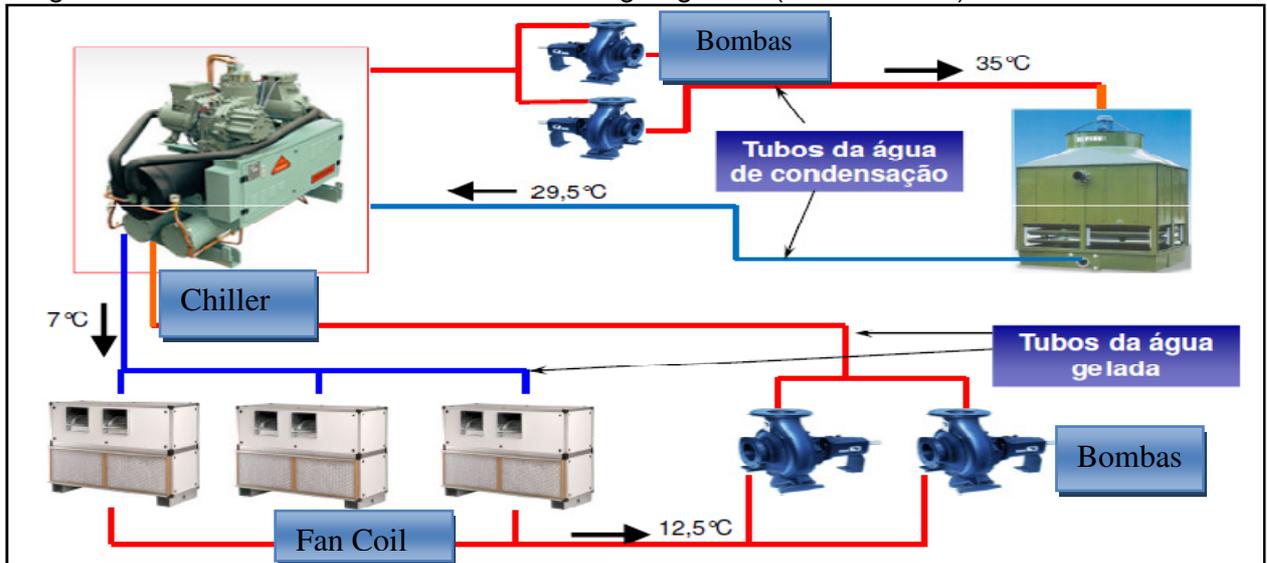
APÊNDICE II

Resultados obtidos na simulação.

ZONA	Área [m²]	Potência Iluminação [W]	Potência de refrigeração [W]	Potência Aquecimento [W]	Vazão ar Renovação [m³/s]
TERREO ALA LESTE A	267.81	4552.77	34243.6	27029.48	1.44
TERREO ALA LESTE A1	252.04	4284.68	32811.12	26854.74	1.37
TERREO ALA LESTE B	252.04	4284.68	32813.61	26855.08	1.37
TERREO ALA LESTE B1	255.6	4345.2	32961.38	26873.94	1.38
TERREO ALA LESTE C	251.44	4274.48	32830.05	26857.19	1.37
TERREO ALA OESTE A	270.36	4596.12	41749.8	27679.15	1.82
TERREO ALA OESTE A1	249.49	4241.33	39194.12	27477.59	1.68
TERREO ALA OESTE B1	253.9	4316.3	29275.14	26216.31	1.15
TERREO ALA OESTE B	253.74	4313.58	29044.43	26175.8	1.14
TERREO ALA OESTE C	252.9	4299.3	36885.98	27255.61	1.55
TERREO ALA OESTE C1	266.95	4538.15	41685.45	27669.48	1.81
TERREO ALA LESTE C1	270.6	4600.2	34364.35	27035.03	1.44
TIPO ALA OESTE B1	253.9	4316.3	34478.82	18921.67	1.56
TIPO ALA OESTE B	253.74	4313.58	34630.8	18934.34	1.57
TIPO ALA OESTE C1	266.95	4538.15	36542.19	19084.65	1.68
TIPO ALA OESTE C	252.9	4299.3	34575.68	18929.75	1.57
TIPO ALA LESTE C	1760.08	29921.36	198176.6	129515.1	8.75
TIPO ALA LESTE B1	1789.2	30416.4	199048.9	129572	8.8
TIPO ALA OESTE A1	1746.43	29689.31	240218.9	132356.3	10.89
TIPO ALA OESTE A	1892.52	32172.84	256334.1	133662.1	11.79
TIPO ALA LESTE B	1764.28	29992.76	198092.2	129509.5	8.74
TIPO ALA LESTE C1	1894.2	32201.4	208430.9	130121.6	9.28
TIPO ALA LESTE A	1874.67	31869.39	208212.6	130109.5	9.26
TIPO ALA LESTE A1	1764.28	29992.76	198053.1	129506.8	8.74
COBERTURA ALA LESTE B	252.04	4284.68	26130.54	14234.37	1.2
COBERTURA ALA LESTE A	267.81	4552.77	27542.37	14338.93	1.28
COBERTURA ALA LESTE C1	270.6	4600.2	27574.92	14341.22	1.28
COBERTURA ALA OESTE A	270.36	4596.12	34388.09	14723.6	1.64
COBERTURA ALA OESTE A 1	249.49	4241.33	32089.19	14607.84	1.51
COBERTURA ALA LESTE C	251.44	4274.48	26141.37	14235.25	1.2
COBERTURA ALA OESTE C1	266.95	4538.15	34294.35	14717.11	1.63
COBERTURA ALA OESTE B1	253.9	4316.3	32412.24	14624.81	1.53
COBERTURA ALA OESTE C	252.9	4299.3	32257.14	14616.71	1.52
COBERTURA ALA LESTE A1	252.04	4284.68	32354.18	14621.78	1.53
COBERTURA ALA LESTE B1	255.6	4345.2	26127.79	14234.13	1.2
COBERTURA ALA OESTE B	253.74	4313.58	26270.75	14245.62	1.21

ANEXO I

Diagrama de um sistema de ar-condicionado Água gelada (Fonte Hitachi).



ANEXO II

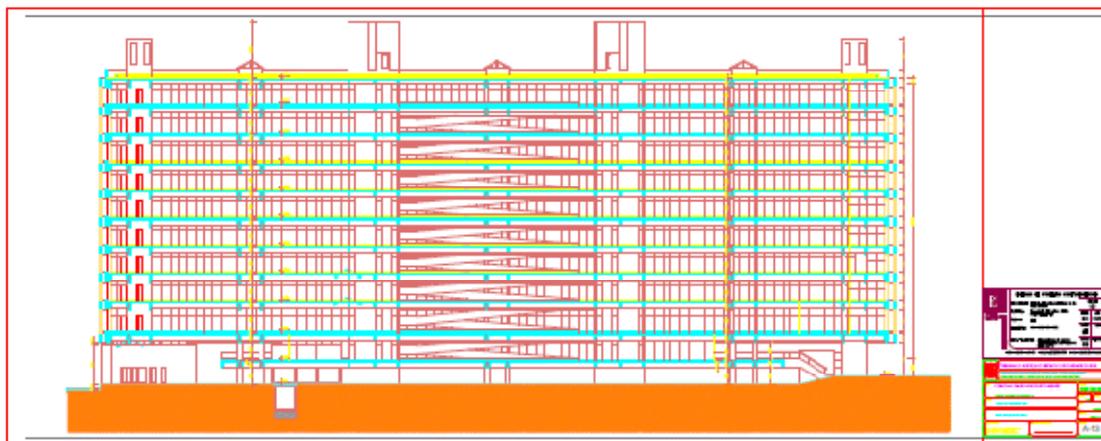
Diagrama de um sistema de ar-condicionado VRF, (Fonte Hitachi).



Anexo III

Plantas da edificação.

Planta em corte, fachada.



Planta baixa, pavimento típico.

